퍼지 및 지능시스템학회 논문지 2007, Vol. 17, No. 5, pp. 640-647

유전 알고리즘을 이용한 휴머노이드 로봇의 관절 제어기에 관한 연구

A Study on the Joint Controller for a Humanoid Robot based on Genetic Algorithm

공정식*, 김진걸**
Jung-Shik Kong* and Jin-Geol Kim**

* 대덕대학 마이크로로봇과
** 인하대학교 전자전기공학부

요 약

본 논문은 유전알고리즘을 기초로 한 휴머노이드 로봇의 관절 제어에 관한 논문이다. 휴머노이드 로봇은 지면에 고정된 시스템이 아니기 때문에 기본적으로 불안정성을 내포하고 있다. 게다가 각 관절의 비선형성은 로봇의 안정성에 악영향을 미친다. 이에 만약 둘 중 하나라도 안정하지 못하면 로봇은 보행 중에 넘어지게 될 것이므로, 휴머노이드 로봇의 안정성을 확보하기 위해서는 이 두 가지가 모두 고려되어야 할 것이다. 이에 본 논문에서는 보행 안정성을 확보하기 위해 이 두 가지 문제 중에 로봇의 비선형성을 제거하면서 로봇이 주어진 궤적을 잘 추종하여 제어할 수 있는 제어기를 제안하였다. 이 제어기는 퍼지-슬라이딩 모드 제어기를 기본으로 하고 있으면서 모션 제어기가 첨가되어 있다. 그리고 이때 이러한 제어 이득값을 유전알고리즘을 통해 추종함으로써 보다 정밀한 제어가 가능하도록 하여 휴머노이드 로봇이 보다 안정적으로 보행할 수 있도록 하였다. 이 모든 과정은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

키워드 : 분산제어, 휴머노이드 로봇, 유전 알고리즘, 모터 제어

Abstract

This paper presents a joint controller for a humanoid robot based on genetic algorithm. A humanoid robot has basically instability during walking because it isn't fixed on the ground. Moreover nonlinearities of the joints increase its instability. If one of them isn't satisfied, the robot may fall down at the ground during walking. To attack one of those problems, joint controller is proposed. It can perform tracking control preciously and reduce the effect of nonlinearities by gear, limitation of the input voltage, coulomb friction and so on. This controller is based on fuzzy-sliding mode controller (FSMC) and compensator and control gains are searched by a proposed genetic algorithm. It can reduce the effect by nonlinearities. Also, to improve the tracking performance, the proposed controller has motion controller. From the given controller, a humanoid robot can moved more preciously. Here, all the processes are investigated through simulations and it is verified experimentally in a real joint system for a humanoid robot.

Key Words : Distributed controller, humanoid robot, genetic algorithm, motor control

1. 서 론

최근 이동 로봇에 대한 관심이 증대되면서 로봇 분야의 기술 발전과 새로운 로봇의 개발이 이루어지고 있다. 특히 인간 형상의 휴머노이드 로봇에 대한 연구의 발전은 과히 혁신적이라 할 수 있다 하겠다. 이러한 휴머노이드 로봇의 대표적인 예로써 혼다 사의 ASIMO[1], 소니사의 SDR-4X[2], 후지쯔 사의 HOAP[3, 4] 등이 있다.

이러한 휴머노이드 로봇의 연구에 있어서 기본적으로 로봇을 안정적으로 보행시키기 위해서는 다양한 알고리즘과 이론들이 적용되어야 하며 또한 이렇게 적용된 다양한 기술과 알고리즘을 융합하는 과정이 이루어져야 한다. 이러한 다양한 기술의 예로써는 로봇의 각 관절의 비선형성과 원하는 시간에 원하는 위치까지 로봇 관절을 제어하기 위한 비선형 및 추종 제어 기법들이 요구되며[5-8], 각 관절간의 동기화 과정 하에서 보행을 수행할 수 있도록 하는 관리 시스템[9], 상황에 따른 로봇의 움직임을 결정할 수 있도록 하는 궤적 생성 알고리즘[10], 로봇의 각 상황을 인지하고 이에 대해 대처할 수 있는 센서 시스템[11, 12] 등이 있다. 그리고 이러한 다양한 시스템 요구 사항을 처리하기 위해서는 각 시스템에 대한 분산 처리와 요구하는 시스템의 각 상황에 맞도록 일을 분배하기 위한 실시간 시스템이 요구된다.

보행을 안정적으로 수행하기 위한 방법으로써는 로봇이 움직일 때 안정성을 유지하는 보행 패턴을 아예 만드는 방법

접수일자 : 2006년 12월 15일
완료일자 : 2007년 5월 3일
이 논문은 인하대학교 지원에 의하여 연구되었음.

과 기구적인 관절의 비선형성을 고려한 관절제어기를 정밀하게 구성하여 안정성을 증대 시키는 방법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 관절 부분의 정밀도와 동작의 적응성을 개선시키는 휴머노이드 로봇의 관절 제어기를 재구성하는 방법을 사용하였다. 휴머노이드 로봇은 많은 비선형성을 가지고 있으므로 휴머노이드 로봇이 안정적인 보행을 수행하기 위해서는 반드시 제거가 필요하여 이를 위한 다양한 연구가 진행되었다[5-8]. 본 논문에서는 휴머노이드 로봇 시스템의 기구부 및 구동부에 나타나는 비선형성을 제거하기 위한 퍼지-슬라이딩 모드 기반의 제어기를 제안한다. 그리고 로봇의 궤적 추종성을 향상시키기 위해 궤적 제어기를 첨가함으로써 로봇이 궤적에 충실히 추종하게 함으로써 안정성이 검증된 궤적을 보행에 적용시켰을 때 로봇이 그 궤적을 추종하여 안정적인 보행을 할 수 있도록 한다. 사용한 제어기는 로봇의 안정적인 보행을 수행할 수 있도록 CAN 기반의 분산 제어기를 구성함으로써 로봇이 움직일 때 동시성을 가지면서 보행을 수행 할 수 있어 로봇의 안정성을 향상시켰다. 본 논문에서는 이렇게 제안된 제어 기법들에 대해 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. 휴머노이드 로봇 시스템

휴머노이드 로봇의 복잡하고 다양한 요구 하에서 시스템을 안정적으로 제어를 수행하기 위해 휴머노이드 로봇의 제어 시스템을 그림 1과 같이 크게 3개로 분할하여 처리하였다.

그림 1에서 첫 번째 부분이 명령해석기(Order Analyzer)로써 사용자의 요구하는 내용에 대해 해석하고 이를 기초로 로봇이 해야 할 상황을 해석하는 역할을 수행한다. 그리고 주제어기(Main Controller)는 시스템을 실시간으로 해석하면서 사용자의 요구에 대한 로봇 행동 궤적을 결정하며 로봇 현재 시스템의 상태를 파악하여 안정적으로 로봇이 보행할 수 있도록 한다. 마지막으로 하부 제어기(Local Controller)는 하부의 모터와 연결된 하부 관절들을 제어하는데, 이 때 하부 관절에 링크에 의해 발생하는 비선형성에 의한 영향을 제거하면서 궤적 추종을 원만하게 수행하도록 하는 제어기를 탑재하고 있다. 그리고 하부 제어기는 로봇의 각 위치에 존재하는 센서 정보를 수집하고 이를 주제어기에 전달하는 역할을 수행한다.

로봇의 안정적인 보행을 수행하기 위해서는 기본적으로 하부 제어기와 주 제어기간의 정확한 동기가 맞춰져야 하며, 로봇의 각 관절의 궤적을 실시간으로 연동하여 처리하여야 한다. 이를 수행하기 위해 하부 제어기와 주제어기 간의 CAN(Controller Area Network)을 이용하여 실시간 시스템을 구축하였으며, 하부 데이터 전송 주기를 40msec, 하부 관절 위치를 주제어기에 전송하기 하는데 10msec, 그리고 하부에서 모터를 제어하는 주기를 1msec로 설계하여 시스템간의 데드라인을 넘기지 않으면서 제어를 수행할 수 있도록 하드웨어를 설계하여 분산시스템을 구성하였다.

3. 하부 제어기 설계

3.1. 유전 알고리즘

실시간 환경 하에서 안정적인 하부 관절을 제어함에 있어서 최적의 궤적을 생성하기 위한 방법으로써 유전알고리즘(GA)을 적용하였다[17]. 유전 알고리즘을 적용함에 있어서 기존의 유전 알고리즘[10-13]의 문제를 개선하기 위해 새로이 개선된 유전 알고리즘을 적용하였다.

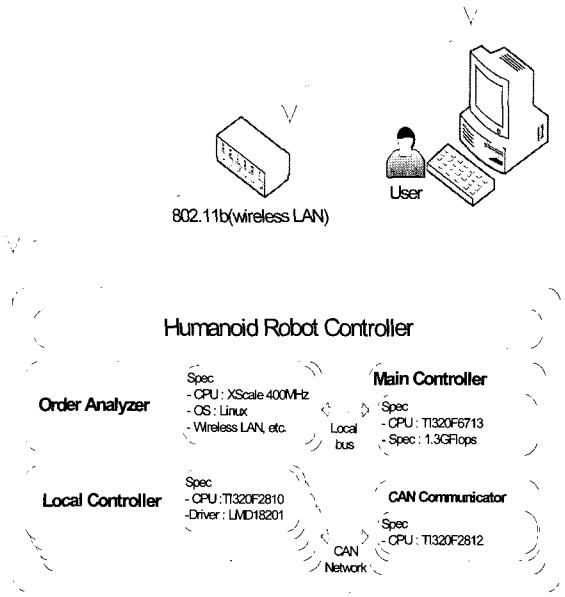


그림 1. 휴머노이드로봇의 제안된 제어 시스템 구성도.
Fig. 1. Proposed control system structure of a humanoid robot

기존의 유전알고리즘은 크게 두 개의 유전 알고리즘으로 나뉠 수 있다. 하나는 이진 유전 알고리즘(Binary coded GA)이고 다른 하나는 십진 철면 유전 알고리즘(Decimal convex GA)이다. 각 알고리즘에 대한 기본적인 교배와 돌연변이는 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

그림 2에서 이진 유전 알고리즘은 유전 알고리즘의 개념을 쉽게 접근할 수 있는 장점을 가지고 있으나 원하는 값을 2진수로 표현하기 때문에 2진수의 해상도에 의해 최적의 해를 찾는 데에 한계를 지니게 된다. 그림 3에서 십진 철면 유전알고리즘을 사용할 경우는 이진 알고리즘에서 발생하는 해상도 문제는 발생하지 않는 장점을 가지고 있지만 세대수가 늘어남에 따라 급격하게 안정 상태로 빠져드는데 이 값은 최적 상태의 근처 값이긴 하나 완전한 최적해로 접근하는 데에는 한계를 지니는 단점을 지니고 있다. 식 (1)과 식(2)는 십진-철면 유전알고리즘의 교배와 돌연변이 식을 나타낸다.

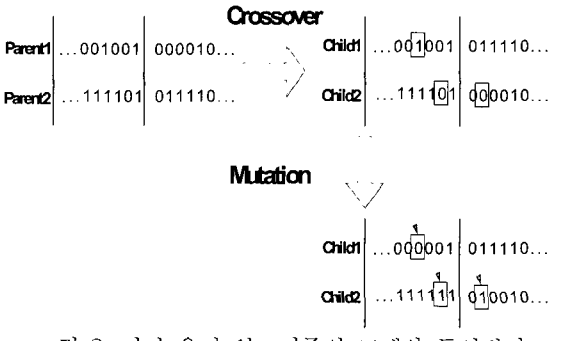


그림 2. 이진 유전 알고리즘의 교배와 돌연변이
Fig. 2. Crossover and mutation of a binary-coded GA

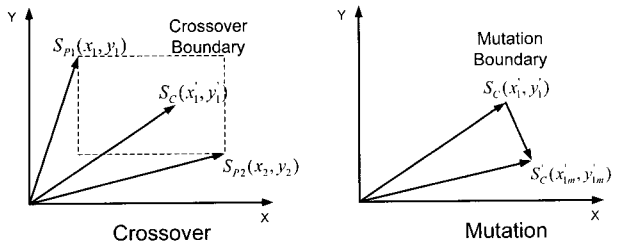


그림 3. 십진-철면 유전 알고리즘의 교배와 돌연변이
Fig. 3. Crossover and Mutation of decimal-convex GA

$$x_1' = x_1 + (1-\lambda_1)x_2,\ x_2' = x_2 + (1-\lambda_2)x_1$$
$$y_1' = y_1 + (1-\lambda_3)y_2,\ x_2' = y_2 + (1-\lambda_4)y_1 \quad (1)$$

$$x_{1m}' = x_1' + \mathrm{sgn}(\alpha)\times d\times\lambda_m$$
$$y_{1m}' = y_1' + \mathrm{sgn}(\alpha)\times d\times\lambda_m \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서 (x_1,y_1)와 (x_2,y_2)는 각각 부모를 의미하며 이에 의한 (x_1',y_1')와 (x_2',y_2')은 교배 결과이고, (x_{1m}',y_{1m}')는 (x_1',y_1')의 돌연변이 결과이다. 그리고 λ_1, λ_2, λ_3, λ_4, λ_m, α는 0과 1 사이의 임의의 값이며$sgn(\alpha)$ 는 임의의 값 α에 대해 0.5이하 일 때는 -1이 되고 0.5 이상 일 때는 1이 되는 함수이다.

이러한 기존의 유전 알고리즘의 단점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 유전 알고리즘을 적용함에 있어서 기존의 유전알고리즘을 개선한 알고리즘(Advanced Genetic Algorithm)을 제안하였다. 이 유전 알고리즘은 십진 철면 알고리즘을 기초로 하고 있으며 시그모이드 함수를 사용하여 일정 세대 이후에 십진-철면 유전알고리즘이 수렴하는 단점을 보완하여 보다 최적의 해를 찾도록 유도하였다. 식(3)~(5)는 제안된 알고리즘에 적용된 교배와 돌연변이 식이다.

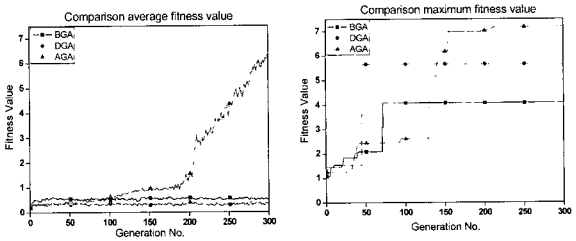
$$x_{1M}' = x_1' + \delta(t)\times\mathrm{sgn}(\alpha)\times d\times\lambda_m$$
$$y_{1M}' = y_1' + \delta(t)\times\mathrm{sgn}(\alpha)\times d\times\lambda_m \quad (3)$$

$$x_1' = x_1 + \delta(t)\times(1-\lambda_1)x_2$$
$$x_2' = x_2 + \delta(t)\times(1-\lambda_2)x_1$$
$$y_1' = y_1 + \delta(t)\times(1-\lambda_3)y_2$$
$$x_2' = y_2 + \delta(t)\times(1-\lambda_4)y_1 \quad (4)$$

$$\delta(t) = \left(1 - \frac{1}{1+e^{-10t+5}}\right),\ t: \text{generation ratio} \quad (5)$$

식(3)과 식(4)에서 기존의 십진-철면 알고리즘에 대해서 시그모이드 함수인 $\delta(t)$를 삽입함으로써 초기에 전역적인 탐색을 수행하고 일정 이상의 세대 수 이후에는 보다 지역적인 탐색을 수행함으로써 보다 최적의 해를 탐색할 수 있다. 새로 제안된 유전 알고리즘에 의한 성능은 그림 4를 통해 나타내었다. 그림 4는 본 논문의 시스템에 적용된 유전 알고리즘에서의 평균 적합도 값과 최대 적합도 값을 나타낸다.

그림 4의 (a)에서 이진 유전알고리즘(BGA) 십진-철면 유전알고리즘(DGA)와 새롭게 제안된 유전 알고리즘(AGA)를 비교하였을 경우 전반부에 전역적인 탐색을 통해 비슷하거나 약간 낮은 적합도 값을 나타내었으나 200세대 이후에 탐색 방법이 보다 지역적으로 바뀌면서 평균 적합도 값이 급격히 오르는 것을 확인할 수 있었으며, 그림 4의 (b)에서 비교한 최대 적합도 값을 비교하였을 때도 제안된 유전 알고리즘이 다른 여하의 유전 알고리즘에 비해 최적값에 보다 근접한 값을 추종함을 알 수 있다.



(a) Average fitness values (b) Maximum fitness values
그림 4. 각 유전 알고리즘의 평균 적합도 값과 최대 적합도 값의 비교
Fig. 4. Comparison of average fitness values and maximum fitness values of each GA

3.2. 모터 식별

모터 시스템을 제어함에 있어서 모터가 가진 시스템 특성을 정확하게 파악하여 시뮬레이션 결과를 실제 시스템에 적용하기 위해 유전 알고리즘을 이용하여 모터를 식별하였다 [14-16]. 이를 위해 먼저 모터에 대해 수학적 모델을 식(6)과 같이 정의 하였다.

$$\frac{\theta_m'(s)}{V_a(s)} = \frac{K_a}{(L_a s + R_a)(J_{eff}s + f_{eff}) + K_a K_b} \quad (6)$$

식 (6)에서 θ_m, V_a, L_a, R_a, K_a, K_b, J_{eff}, f_{eff} 는 각각 모터 출력단에서의 위치, 모터에 인가되는 전압, 모터의 인덕턴스, 모터내의 저항, 모터 토크 상수, 역기전력 상수, 모터 축에 의한 질량 관성 모멘트, 그리고 모터 축에 존재하는 마찰계수를 나타낸다. 이제 식 (6)을 기초로 실험을 통한 실제 모델에 대한 모터 식별 방법에 대한 블록다이어그램에 대해 그림 5로 표현하였다.

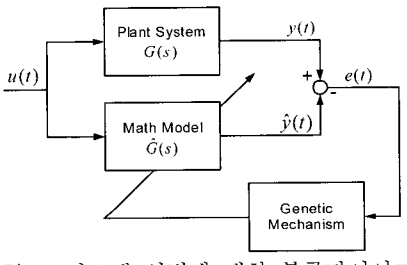


그림 5. 시스템 식별에 대한 블록다이어그램
Fig. 5. Block diagram of system identification

그림 5에서 유전알고리즘을 이용하여 모터 모델을 생성하고 이를 실제 모터 모델과 유전알고리즘에 의해 생성된 수학적 모델을 비교하여 최적의 모터 모델을 찾는 방식을 통해 모터를 식별하였다. 이렇게 모터의 각 매개변수를 찾음으로써 시뮬레이션에 의한 제어 이득값을 다른 변경 없이 직접 적용할 수 있게 됨으로써 로봇과 같은 복잡한 시스템에 빠른 최적 해를 얻을 수 있게 된다.

3.3. 모터 제어기

로봇에는 다양한 종류의 비선형성을 지니고 있다. 대표적인 비선형성이 각 관절에 들어가는 백래쉬, 모터 전압의 한계에 의해 발생하는 포화등이 있다. 이러한 로봇 관절 시스템에 존재하는 비선형성을 제거하면서 제어하는 것이 로봇의 관절 제어에 있어서 중요한 관점이다. 이와 더불어 로봇이 보행을 순조롭게 수행하기 위해서는 로봇 궤적에 대한 추종성에 대한 부분이 제어기에 고려되어야 한다. 이에 본 논문에서는 이러한 비선형성에 대한 고려와 궤적 추종성을 고려하기 위해 그림 6과 같은 제어기를 구성하였다.

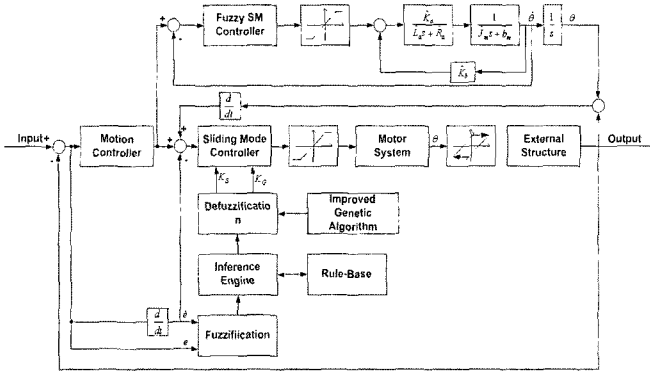


그림 6. 제안된 모터 제어기
Fig. 6. Proposed motor controller

그림 6과 같이 제안된 모터 제어기는 크게 3개의 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째는 로봇의 내부 비선형성인 포화에 의해 발생하는 리밋 사이클을 제거하기 위해 퍼지-슬라이딩 모드 제어기를 제안하였으며 두 번째는 외부 기어와 링크와 같은 외부 구조물(External Structure)을 외란으로 해석하여 이에 대해 발생할 수 있는 오차를 비교하고 이를 수학적 모델과 비교하여 비선형성을 제거하기 위한 비교기이다. 그리고 마지막 부분은 로봇의 궤적 추종성을 확보하여 다른 관절과 동조를 이루면서 보행을 수행할수 있도록 하는 모션 제어부로 나눌 수 있다.

먼저 모터의 비선형성을 제어하기 위해 삽입된 퍼지-슬라이딩 모드 제어기를 구현함에 있어서 퍼지화 과정과 추론 규칙을 이용한 퍼지 값 결정, 그리고 비퍼지화 과정을 통해 슬라이딩 모드에 결정되어야 할 슬라이딩 모드 제어기의 이득값을 결정하였다. 식(7)은 제어기에 적용된 슬라이딩 모드 제어기의 식이다.

$$u = K_G|e|sgn(e + K_S\dot{e}) \tag{7}$$

식 (7)에서 K_S와 K_G는 각각 슬라이딩 모드 제어기의 슬라이딩면의 기울기와 이득값을 나타낸다.

퍼지화 과정에 있어서 받은 입력값은 모터의 속도와 속도의 변화량이며 각각 7개의 중심값을 가진 멤버쉽 함수를 사용하였으며 비퍼지화를 위해 9개의 중심값을 가지고 있는 멤버쉽 함수를 사용하였다. 출력 멤버쉽 함수를 구성할 때, 모터의 방향에 따른 정확한 제어를 위해 출력 멤버쉽 함수를 Z를 기초로 좌우 대칭이 되도록 설계하였다. 그리고 퍼지 추론은 Center Average기법을 이용하여 처리하였다. 그리고 최적의 멤버쉽 값을 추정하기 위해 유전알고리즘을 적용하였다.

두번째로 그림 6에서 제안된 비교기이다. 이 비교기는 실제 시스템에 들어가는 퍼지-슬라이딩 모드 제어기와 유전알고리즘을 통한 모터 식별을 기본으로 한다. 실제 시스템에 대비하여 감속비를 제외한 모든 상황을 실제 시스템과 동일화 시키는 과정을 통해 실제 예상되는 모터 출력 위치와 실제 모터의 위치와의 차이, 즉 모터의 백래쉬와 외부 부하에 의해 생성되는 생기는 오차를 계산해 낼 수 있다. 이를 토대로 외부 비선형성에 대한 고려를 할 수 있으며 또 이로부터 궤적 추종성을 향상 시킨다.

마지막으로 주 제어기로부터 들어오는 궤적을 제어하기 위한 궤적 제어기이다. 이 제어 부분은 로봇이 실제 움직임에 대한 궤적을 하부 제어기에 전송할 때, 이 전송된 부분이 오차 없이 제어되게끔 하는 역할을 수행하며 이때 PI 제어기를 적용해 궤적 제어 성능을 향상 시켰다

4. 모의실험

분산 처리 하의 휴머노이드 로봇을 안정적으로 제어하기 위한 모터 제어기를 구현하기 위해, 먼저 유전알고리즘을 이용하여 자체 개발한 휴머노이드 로봇 ISHURO-I에 내장된 Maxon사의 Re-max 24를 Microsoft사의 Visual C++을 이용하여 모터 식별을 수행하였다[18]. 식 (8)과 식(9)는 각각 사양을 이용한 모터의 수학적 모델과 유전알고리즘을 이용하였을 때의 수학적 모델이고 그림 7은 시스템 식별 결과이다.

$$\frac{\dot{\theta}_m(s)}{V_a(s)} = \frac{176401.38}{s^2 + 16484.43s + 565467.1} \tag{8}$$

$$\frac{\dot{\theta}_m(s)}{V_a(s)} = \frac{110464760.272}{s^2 + 16340.322s + 1992784.27530} \tag{9}$$

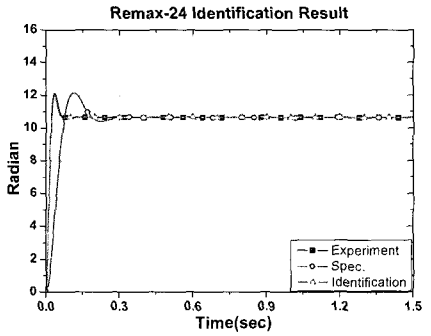


그림 7. 모터 식별 결과
Fig. 7. The result of motor identification

그림 7에서 모터 식별을 수행했을 때 유전 알고리즘을 통해 생성된 모터 식별 결과는 모터 사양에 의해 나온 결과에 비해 오차의 합이 9.25배 차이가 남을 알 수 있었다. 이제 모의실험을 통한 모터 식별을 기초로 제안된 제어기에 대해 유전 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어기의 제어 이득값을 생성하였다. 이때 사용된 유전 알고리즘의 매개 변수는 표 1과 같다.

표 1의 적합도 함수(fitness function)에서의 P_R은 모터를 10msec 간격으로 모터 상태를 측정했을 때의 모터의 위치를 나타내며 P_M은 유전알고리즘에서 생성된 모델에 대해 10msec 간격으로 모의실험을 수행했을 때의 모터의 위치를

나타낸다. 그리고 퍼지-슬라이딩 모드의 유전 알고리즘을 적용하기 위한 유전 알고리즘의 매개변수는 표 2와 같고 이를 통해 나온 퍼지 슬라이딩 모드 이득값은 표 3과 같다. 표 2에서 유전 알고리즘을 적용했을 때 기본적인 매개변수는 모터 식별에서 사용한 값과 동일하며 적합도 함수를 모터 시뮬레이션 상에서 발생하는 오차(err)값의 최소값을 최적으로 하기 위한 적합도 함수를 사용하였으며 이때 사용한 궤적은 삼각파를 이용하였다.

표 1. 모터 식별에서 사용된 유전알고리즘의 매개 변수
Table 1. Parameter of genetic algorithm at the motor identification

Gen. No	300	Pop. No.	200
Crossover	0.6	Mutation	0.1
Fitness Function	$fit = 1/\sum\lvert P_R - P_M \rvert$		

표 2. 퍼지 슬라이딩 모드 제어기에서 사용된 유전알고리즘의 매개 변수
Table 2. Parameter of genetic algorithm at FSMC

Gen. No	300	Pop. No.	200
Crossover	0.6	Mutation	0.1
Fitness Function	$fit = 1/\sum(err)^2$		

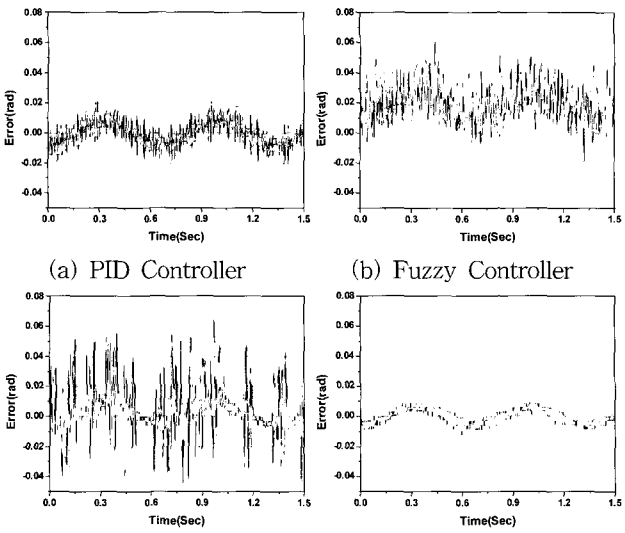
표 3. 제안된 유전알고리즘에 의한 퍼지 슬라이딩모드 제어기의 최적 이득값
Table 3. Optimal value of FSMC by proposed genetic algorithm

Center Value	0.0	0.061	0.122	0.183	0.245	0.305
K_G	60.74	9.93	79.16	54.49	55.13	80.52
K_S	0.005	0.0049	0.005	0.005	0.005	0.005

표 3에서 Center Value는 비 퍼지화 과정에서의 멤버쉽 함수의 중간 값으로 이때의 K_S와 K_G는 슬라이딩 모드 제어기에 적용될 퍼지값이다. 이렇게 적용된 결과에 대해 PID 제어기, 퍼지 제어기, 퍼지-PID제어기, 제안된 제어기에 대해 로봇 궤적과 가장 유사한 삼각파 입력에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8은 모의실험에서의 삼각함수 입력에 대한 오차 비교결과이다.

그림 8에서 실험에 적용된 PID제어기와, 퍼지 제어기, 퍼지-PID제어기와 제안된 제어에 대해 공정한 실험을 수행하기 위해 각각 유전 알고리즘을 이용하여 최적의 이득값을 생성하였다. 이때 적용된 삼각함수 입력은 진폭이 0.920rad으로 하였으며 주파수를 1.5Hz로 하였다. 그림 8의 모의실험 결과를 비교하였을 때 그림 8의 (a)인 PID제어기의 경우 0.021rad정도의 위치오차가 나타났다. 그림 8의 (b)인 퍼지 제어 알고리즘의 경우 0.07rad의 위치 오차가 나타났으며 그림 8의 (c)인 퍼지 PID 제어 알고리즘의 경우 오차가 퍼지 알고리즘에 비해 약간 줄어들어 0.067rad정도의 최대 오차가 나타났다. 제안된 제어기에 의한 오차는 그림 8의 (d)에 나타나 있으며 최대 오차는 0.01rad으로 가장 좋은 제어 성능을 보였다.

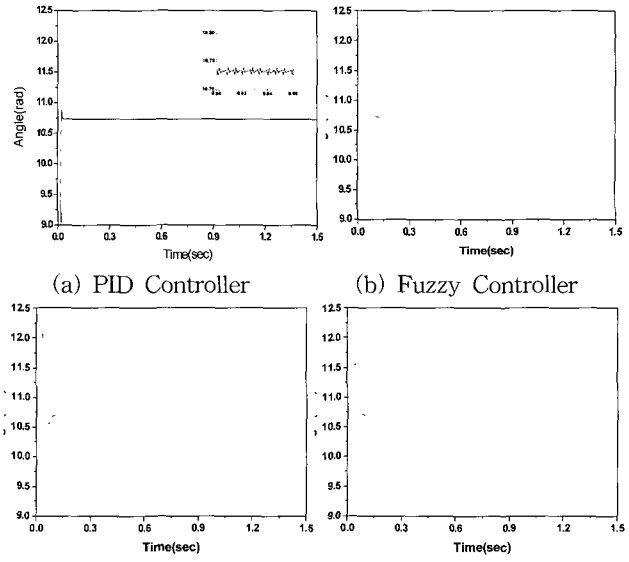
그리고 이렇게 생성된 제어 이득값을 검증하기 위해 계단 입력을 비교하여 그 성능을 확인하였다 그림 9는 계단 입력에 대한 각 제어기의 모의실험 비교 결과이다.



(a) PID Controller (b) Fuzzy Controller

(c) Fuzzy-PID Controller (d) Proposed Controller

그림 8. 삼각함수에 대한 각 제어기의 모의 실험 비교
Fig. 8. Comparison of errors of each controller by sinusoidal input at the simulation



(a) PID Controller (b) Fuzzy Controller

(c) Fuzzy-PID Controller (d) Proposed Controller

그림 9. 계단 입력에 대한 각 제어기 모의 실험 비교
Fig. 9. Comparison of output of each controller by step input at the simulation.

그림 9에서 (a)의 PID 제어기의 경우 입력값 10.73rad에 대한 출력의 P.O(Percent of Overshoot)이 1.37%이고 Settling Time이 27ms로 입력에 대해 빠른 응답속도를 나타내고 있으나 모터의 비선형성을 고려했을 때 나타나는 리밋 사이클(limit cycle)이 존재하였다. 리밋 사이클의 크기는 0.001rad이고 주파수는 200Hz였다. 그림 9(b)의 퍼지 제어기를 사용할 경우에는 비선형성에 대한 리밋 사이클이 제거되

었으나 Settling Time이 104ms로 응답 속도가 느렸다. 그림 9(c) 퍼지 PID로 제어기를 구현하였을 경우 응답속도는 98ms로 퍼지 제어기에 비해 응답속도가 빨라졌으나 P.O가 12.7%로 과응답이 생겼음을 알 수 있었다. 이에 대해 그림 9(d)의 새로이 제안된 제어기는 P.O가 7.7%이고 Settling Time이 78ms가 되었다. 로봇 제어에 있어서는 응답속도에 대한 부분이 중요한 부분이기 때문에 리밋 사이클에 대한 응답속도가 가장 좋은 제안된 제어기를 이용할 경우 요구한 출력을 얻을 수 있었다.

이러한 실험을 바탕으로 로봇의 안정성의 기초가 되는 ZMP(Zero Moment Point)값을 확인을 통해 로봇 하부 제어기의 안정성이 로봇 전체에 안정성에 미치는 영향을 시뮬레이션 하여 검증하였다. 그림 10은 각각 이상적인 경우와 단순 PID제어기를 삽입하였을 경우 그리고 제안된 제어기를 사용하였을 경우의 ZMP 값을 나타낸다.

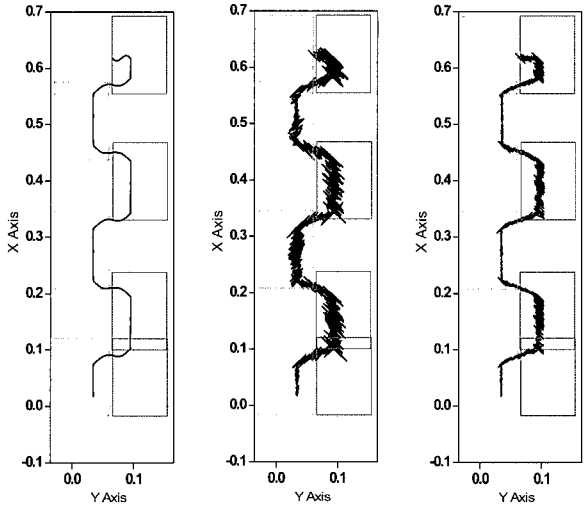


그림 10. ZMP 비교 (a) 이상적인 경우 (b) PID제어기 (c) 제안된 제어기

Fig. 10. Comparision of ZMP (a) Ideal Case (b) PID controller (c) Proposed Controller

그림 10로부터 실제 모터가 이상적인 제어를 수행할 경우, 오차 없이 로봇이 움직인다고 가정할 경우 ZMP는 그림 10(a)와 같이 부드럽고 ZMP정보가 발바닥 내에 존재하는 안정적인 보행을 수행하게 된다. 그러나 실제 모터를 가지고 제어를 할 경우에 로봇의 하부 제어기가 가진 오차에 의해 실제 ZMP와는 다른 패턴으로 움직이게 된다. 즉 그림 10(b)의 경우에서와 같이 궤적이 ZMP가 로봇 발바닥 내에 존재해서 안정한 상황으로 궤적을 주었음에도 불구하고 하부 제어기가 안정적이지 못할 경우 ZMP가 밖으로 벗어나는 경우가 발생할 수 있지만 그림 10(c)의 경우에서와 같이 제어기가 휴머노이드 로봇의 상황에 맞춰 구성되었을 경우 비교적 이상적인 상황을 잘 추종함을 알 수 있다.

5. 실 험

모의실험을 통해 생성된 결과를 기초로 인하대에서 개발한 휴머노이드 로봇인 ISHURO-I의 각 관절에 직접 실험을 수행하여 결과를 유추하였고 이를 기초로 로봇 보행에 직접 적용하여 실험을 수행하였다. 실험을 위해 먼저 모의실험을 통해 생성된 각 제어기의 이득값에 대해 임의의 값 조정 없이 실험에 적용하여 제어기의 성능을 확인하였다. 그림 11부터 그림 14까지는 각 제어기에 삼각함수 입력을 가지고 제어를 수행하였을 경우의 실험에 의한 오차 비교이다. 그림 11에서 PID제어기일 경우 최대 오차가 0.0951rad, 오차의 평균은 0.0003rad, 오차의 분산은 0.054이었고, 그림 12의 퍼지 제어기의 경우 최대오차가 0.210rad, 오차의 평균은 0.0122rad, 오차의 분산은 0.0845이었다. 그림 13에서 퍼지 PID 제어기의 경우 최대 오차는 0.110rad, 오차의 평균은 0.0127rad, 오차의 분산은 0.0600이었다. 마지막으로 그림 14에서의 삼각함수에 대해 제안된 알고리즘을 적용했을 때의 오차의 최대값은 0.0860rad이었고, 오차의 평균은 -0.0552rad, 오차의 분산은 0.032032였다. 제안된 알고리즘을 적용했을 때의 최대 오차인 상태로 보았을 때나 오차의 분산의 경우 모두 최소의 오차 상황을 나타내었으며, 이에 제안된 알고리즘이 다른 여하의 제어기에 비해 로봇 제어에 최적의 성능을 보임을 알 수 있었다. 이렇게 증명된 실험 결과를 기초로 제안된 제어기를 이용하여 로봇 관절에 적용하였다.

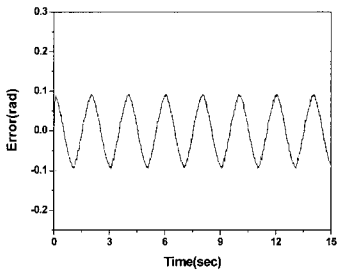


그림 11. 삼각함수에 대한 PID 제어기의 실험오차

Fig. 11. Experimental error of PID controller at sinusoidal input

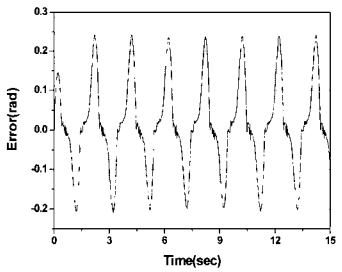


그림 12. 삼각함수에 대한 퍼지 제어기의 실험오차

Fig. 12. Experimental error of fuzzy controller at sinusoidal input

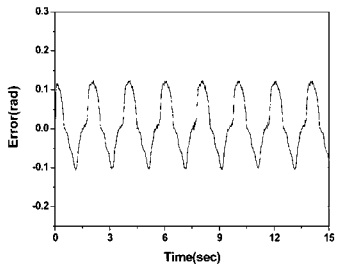


그림 13. 삼각함수에 대한 퍼지-PID 제어기의 실험오차

Fig. 13. Experimental error of fuzzy-PID controller at sinusoidal input

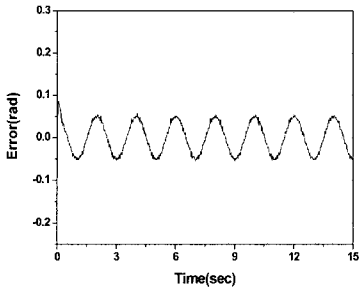


그림 14. 삼각함수에 대한 제안된 제어기의 실험오차
Fig. 14. Experimental error of proposed controller at sinusoidal input

6. 결 론

본 논문에서는 휴머노이드 로봇 시스템을 분산 처리 기법을 기반으로 하여 하부 제어기, 주 제어기, 명령해석기로 나누어 설계하고 이를 로봇 관절 모터 제어 시스템에 적용하였다. 그리고 이러한 전반적인 시스템 상황 하에서 로봇에 존재하는 비선형성에 의한 영향을 제거하고 원하는 궤적에 최적으로 제어하기 위해 유전 알고리즘을 이용하여 휴머노이드 로봇 관절 제어기를 생성하였으며 모의실험과 실험을 통해 로봇 각 관절에 비선형성에 의한 영향을 최소화하면서 궤적 추종성을 향상시키는 제어기를 개발하였다. 개발된 제어시스템은 기존의 모터 시스템에서 고려되지 않는 로봇만이 가지고 있는 다양한 비선형성을 시스템의 특성에 맞는 제어기들을 삽입하여 처리함으로써 로봇의 비선형성에 의해 발생하는 다양한 문제들-리밋사이클에 의한 토크감소 및 로봇 보행 안정성의 위협-에 대처할 수 있었으며 이를 실험을 통해 검증하였다.

향후 휴머노이드 로봇의 보행 안정성을 증대시키기 위한 모의실험만이 아닌 실제 보행에 적용하기 위한 ZMP계측 방법에 대한 적용 및 이에 따른 보행의 안정도를 증대 시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한 장애물이나 외부 환경에 보다 친밀하게 움직임을 수행하기 위해 휴머노이드 로봇 시스템의 안정화를 위한 실시간 동역학 해석 및 실시간 동작 생성 알고리즘이 요구되며 또한 비전과 같은 센서 시스템을 이용하여 외부 환경에 보다 유연하게 대처하기 위한 로봇 시스템이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyarna, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: System overview and integration," *IEEE/RSJ International Conference*, vol.3, pp.2478-2483, 2002.

[2] Fujita, M., Kuroki, Y., Ishida, T., and Doi, T.T., "Autonomous behavior control architecture of entertainment humanoid robot SDR-4X," *Intelligent Robots and Systems (IROS2003)*, vol. 1, pp. 960 - 967, 2003.

[3] Riezenman, M.J., "Robots stand on own two feet," *Spectrum IEEE*, vol. 39, pp. 24-25, Aug. 2002

[4] Kurazume, R., Hasegawa, T. and Yoneda, K., "The sway compensation trajectory for a biped robot," *ICRA '03*, vol. 1, pp. 925-931, 2003.

[5] Jong-shik Kong, Bo-hee Lee, and Jin-Geol Kim, "Design of a Switching PID Controller Using Advanced Genetic Algorithm for a Nonlinear System," *LNAI 3801*, pp 176-183, 2005.

[6] Peng Yang, Xin Kong, Zuo-Jun Liu, He Chen, Qi Zhau, and Jia Liu, "Hybrid Joint Controller For Humanoid Robot," *Int. Conf. on Machine Learning Cybernetics*, pp. 4188-4192, 2005.

[7] Damien Kee, Gordon WyETH, and Jonathon Roberts, "Biologically Inspired Joint Control for a Humanoid Robot," *Int. Conf. on Humanoid Robots*, pp. 385-401, 2004.

[8] Byung-Jae Jung, Jung-Shik Kong, Bo-hee Lee, Sang-Min Ahn, and Jin-Geol Kim, "Backlash Compensation for a Humanoid Robot Using Disturbance Observer," *Int. Conf. On IECON*, pp. 2042-2047, 2004.

[9] Tatshzo Ishida, Yoshibiro Kuroki, Jin'ichi Yamaguchi, Masahiro Fujita and Toshi T. Doi, "Motion Entertainment by a Small Humanoid Robot Based on OPEN-R," *IEEE/RSJ*, pp. 1079-1086, 2001.

[10] M. Yagi and V. Lumelsky, "Biped Robot Locomotion in Scenes with Unknown Obstacles," *International Conference on Robotics & Automation*, pp. 375-380, 1999.

[11] Atsushi Konno, Yusuke Tanida, Koyu Abe, and Masaru Uchiyama, "A Plantar H-slip Force Sensor for Humanoid Robots to Detect the Reaction Forces," *Intelligent Robots and Systems*, pp. 1470-1475, 2005.

[12] Koichi Nichiwaki, Yoshifumi Murakami, Satoshi Kagami, Yasuo Kuniyoshi, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue, "A Six-axis Force Sensor with Parallel Support Mechanicm to Measure to Ground Reaction Force of Humanoid Robot," *International conference on Robotics and Automation*, pp. 2277-2282, 2002.

[13] Akramizadeh, A., Farjami, A.A., and Khaloozadeh, H., "Nonlinear Hammerstein Model Identification Using Genetic Algorithm," *Int. Conf. ICAIS* pp. 351-356, 2002.

[14] Mitsukura, Y., Fukumi, M., Akamatsu, N., and Yarnamoto, T. "A System Identification Method Using a Hybrid-type Genetic Algorithm," *SICE* Vol. 3, pp.1598-1602, 2002.

[15] Tipsuwanporn, V., Piyarat, W., Tarasantisuk, C., Suesut, T., and Charean, A., "Identification of Motion Control System Using Genetic Algorithms," *Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems*, Vol. 2, pp. 854-857, 2001.

[16] Liu Changliang, Liu Jizhen, Niu Yuguang, and Yao Wanye, "The Application of Genetic Algorithm in Model Identification," *TENCON '02*

Vol. 3, pp.1261-1264, 2002.
[17] Jung-Shik Kong, Jin-Geol Kim, and Bo-Hee Lee, "A Study on the Posture Control of a Humanoid Robot," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 77-83, 2005.
[18] Jung-Shik Kong and Jin-Geol Kim, "Identification of a Motor with Multiple Nonlinearities by Improved Genetic Algorithm," *LNAI*, 3683, pp.981-987, 2005.

저 자 소 개

공정식(Jung-Shik Kong)
1998년 : 인하대학교 자동화공학과(공학사). 2006년 인하대학교 대학원 자동화공학과(공학박사).
2007~현재 : 대덕대학 마이크로로봇과 전임강사,

관심분야 : 표적추적, 비선형 제어, 실시간 제어, 로봇 제어, 의용공학

Phone : 042-866-0335
Fax : 042-866-0468
E-mail : jskong@ddc.ac.kr

김진걸(Jin-Geol Kim)
1978년 : 서울대 전기공학과 졸업(공학사).
1988년 : Univ. Of Iowa 전기 및 컴퓨터 공학 졸업(공학박사).
1988년~현재 : 인하대학교 전자전기 공학부 전기공학과 교수,

관심분야 : 비선형 제어, 보행로봇, 지능형 로봇.

Phone : 032-860-7384
Fax : 032-863-5822
E-mail : john@inha.ac.kr